

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

# ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему "Климатическая оценка волнения в восточной части Финского залива"

Исполнитель

<u>Рычкова Полина Михайловна</u> (фамилия, имя, отчество)

Руководить

кандидат географических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Гордеева Светлана Михайловна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

(подпись)

кандидат географических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

<u>Хаймина Ольга Владимировна</u> (фамилия, имя, отчество)

« » 2022 г.

Санкт-Петербург

2022

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ
Глава 1 Проблема и общая характеристика района исследования 4
1.1. Физико-географическое описание восточной части Финского залива 4
1.2 Морские волны 7
1.3 Проблема размытия берегов9
1.4 Разрушение береговой зоны Финского залива 11
Глава 2 Материалы и методы исследования 15
2.1. Данные об индикаторах ветрового волнения
2.2 Данные о ветровом волнении 17
2.3 Статистические методы оценивания климатических изменений 20
Глава 3 Сравнительный анализ высоты ветрового волнения за разные периоды
времени по данным индикаторов
Глава 4. Сравнительный статистический анализ характеристик волнения за
разные периоды времени по данным реанализа
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
Список использованных источников
Приложение А
Приложение Б 47
Приложение В 48
Приноуковича Г (40)

#### ВВЕДЕНИЕ

Волнение является одним из важнейших разделов океанологии. С помощью его характеристик определяется не только состояния поверхности Мирового океана, но и осуществляется деятельность, направленная на улучшение эффективности таких сфер, как безопасность жизнедеятельности, экономика, рыболовство, строительство, мореплавание и многое другое. Однако из-за недостатка исследования волнения Финского залива за длительные промежутки времени, невозможно качественно оценить его изменения и проблемы которые это вызывает. Особенно остро с этим можно столкнуться в восточной части Финского залива.

Объект исследования: восточная часть Финского залива.

Предмет исследования: характеристики ветрового волнения.

Цель работы: провести климатическую оценку волнения в Финском заливе, особенно в части, приуроченной к Российской Федерации.

Задачи:

1. Раскрыть основные физико-географические особенности восточной части Финского залива;

2. Выявить и раскрыть проблему разрушения берегов в исследуемом регионе;

3. Провести сравнительный статистический анализ характеристик волнения за разные периоды времени по данным индикаторов ветрового волнения;

4. Провести сравнительный статистический анализ характеристик волнения за разные периоды времени по данным реанализа.

3

### Глава 1 Проблема и общая характеристика района исследования

# 1.1.Физико-географическое описание восточной части Финского залива

Финский залив - наиболее крупный объект Балтийского моря, омывающий берега Финляндии, России и Эстонии. Это относительно узкий залив, максимальная ширина которого 135 км по меридиану Нарвского залива, при подходе к открытому морю сужается до 75 км. Он вытянут с запада на восток на 410 км. Общая площадь водной поверхности -29,7 тыс. км<sup>2</sup>. Это всего 7% от общей площади Балтийского моря. Общая площадь водосбора залива - 420 тыс. км<sup>2</sup>. К Российской Федерации относится наиболее восточная часть залива (рисунок 1). [1].



Рисунок 1 - Восточная часть Финского залива Балтийского моря: 1 - Невская губа, 2 - Выборгский залив, 3 - Копорская губа, 4- Лужская губа, 5 - Нарвский залив.

Общая площадь исследуемой акватории 11 тыс. км<sup>2</sup>. Протяженность около 140 км. Береговая линия образует пять крупных заливов - на северном береге - Выборгский и на южном береге - Нарвский залив, Лужская и Копорская губы. На востоке Финский залив замыкается Невской губой.

Река Нева впадает в Финский залив и определяет его гидрологический режим. Также значение имеют реки Луга и Нарова, впадающие в залив с южного берега, и Сайменская система каналов, расположенная на северном берегу. Циркуляция вод характеризуется входящим течением, идущего к востоку вдоль северного берега, и более сильным выходящим, идущего вдоль южного берега, в совокупности с временными волновыми, сгонно-нагонными, дрейфовыми и стоковыми явлениями. Скорость придонных течений за исключением аномальных ситуаций не выходит за пределы 0,1-0,5 м/сек [2].



Рисунок 2- Карта глубин Восточной части Финского залива [3]

Подводный береговой склон в восточной части Финского залива, как правило, отмелый. Характерной особенностью морфологии считаются подводные террасы, окаймляющих берега и ряд островов [4].

Глубины. Большая часть залива мелководна, ее средняя глубина 38 м. Максимум глубины 105 м к западу от о-ва Гогланд. (рисунок 2) Дно залива изобилует грядами, холмами и локальными депрессиями различной величины. Особенно расчлененное дно наблюдается вблизи северного берега залива в районе шхер Выборгского залива. У южного берега залива дно значительно ровнее [5].

Уровень моря. Приливы и отливы в восточной части Финского залива незначительны. Основные изменения происходят за счет внутренних волн и нагонных колебаний уровня, доводящие ситуацию до наводнения. Наиболее значителен штормовой нагон, который возникает в результате дрейфа и длинных волн. Максимальные наводнения связаны с прогрессивными вынужденными волнами, находящимися в резонансе с циклонами, двигающимися над Балтийским морем и Финским заливом с запада на восток [6]. Также на колебания уровня воды в Финском заливе существенное влияние оказывает также речной сток (сток Невы составляет 80 км3 /год) [7].

Климат. Характерные особенности климата этого региона: облачность, высокая влажность и частые осадки [8]. По данным за период 2005-2021 годы самый холодный месяц - февраль со среднемесячной температурой от -5,2°С. Когда средняя месячная температура воздуха составляет 6,7°С. В суровые зимы температура воздуха на побережье понижается до -27,7°С. Наиболее теплый месяц июль. Когда средняя месячная температура воздуха составляет 17,1°С, в отдельные дни, повышаясь до 36,7°С. Суточные колебания температуры возрастают от зимы к лету и составляют соответственно 3-7°С и 6-12°С. По данным СПб ЦГМС-Р, с 1940-х годов наблюдается повышение средней температуры по десятилетиям. С 2000 по 2008 годы среднегодовые температуры превышали норму на 0,7–2,3°С.

Температура воды в заливе около 0°С удерживается в феврале-марте и поднимается примерно до 17°С августе сентябре. Термоклин летом располагается на глубине 15 м. В зимнее время опускается до 70-80 м. Лед образуется практически ежегодно, но время его существования и площади распространения сильно меняются, вплоть до возникновения практически безледных периодов или наоборот повышенной ледовитости. Средние даты установления ледового покрова приходятся на ноябрь-декабрь, максимум ледовитости достигается в феврале - марте.

**Соленость**. Эту часть можно отнести к олигогалинным водам, так как она колеблется в пределах 0,08 - 5‰. Сильное опреснение происходит за счет речного стока. Почти всегда сохраняется различие солености верхнего и придонного слоя воды [1,3].

### 1.2 Морские волны

Это вертикальные перемещения частиц воды на морской поверхности. Они возникают по разным причинам и в основном делятся на капиллярные, гравитационные: ультра, обычные, инфра, длиннопериодные и приливные. Приливные волны образуются за счет притяжения Луны и Солнца, а капиллярные возникают из-за напряжения ветра и поверхностного натяжения. Основные виды волн, встречающихся в Мировом океане, показаны на рисунке 3.



Рисунок 3 - Основные виды волн, встречающихся в Мировом океане [9]

Тип волн	Физический механизм (причина)	Периоды			
Капиллярные	Напряжение ветра и поверхностное натяжение	<1 сек.			
Ветровые	Напряжение ветра и сила тяжести	<20 сек			
Зыбь	Ветровые волны	<30сек			
Прибойные биения	Групповая структура волн	1-5 минут			
Сейши	Колебания атмосферного давления и др. причины	2-40 минут и более			
Тягун	Прибойные биения и групповая структура	2-40 минут			
Цунами	Землетрясения	10 мин 2 час.			
Штормовые нагоны	Напряжение ветра, изменение атмосферного давления, перемещение циклонов	1-4 суток			
Приливы	Притяжение луны и солнца, вращение земли, законы всемирного тяготения	12-24 час.			

Таблица 1- Основные типы волн на поверхности воды

Некоторые из волн являются неустойчивыми, например капиллярные волны, которые при стихании ветра тут же исчезают. Развитые гравитационные волны могут сохраняться продолжительное время и распространяться на большие расстояния без значительной потери энергии [9]. Также волны могут делиться на вынужденные, находящиеся под действием ветра; свободные или зыбь, распространяющиеся после прекращения ветра или вышедшие из зоны его воздействия; смешанные (трехмерные волны).

Обычно для описания берется за простая гармоническая волна, описывающая:

$$\eta(x,t) = a\cos(kx - \omega t + \varepsilon),$$

где η - колебания поверхности относительно среднего уровня моря; а – амплитуда; k – волновое число; ω – угловая частота; ε – фазовый сдвиг; x – горизонтальная координата; t – время.



Рисунок 4 - Профиль синусоидальной волны с различными параметрами

Такая волна повторяет себя и имеет синусоидальную форму. В реальности же волны на море не могут быть описаны одной синусоидой, так как они образуются в результате наложения множества волн с разными периодами и фазами [10].

### 1.3 Проблема размытия берегов

Береговая зона - зона активного динамического взаимодействия между сушей и океаном. Она включает в себя берег и подводный береговой склон. Там происходят постоянные изменения форм рельефа и выдвижение береговой линии к суше или к морю [11]. Обычно пляж сложен более крупными наносами (обломочный материал, перемещаемый волнами), чем подводной береговой склон.

По происхождению берег делится на:

Аккумулятивный, где происходит накопление материала;

Абразионный, где наоборот идет размытие. [12].

Абразия - процесс разрушения береговой зоны под действием волн и прибоя [13]. Различают несколько разновидностей:

1. Механическая, то есть происходящая под действием гидравлического удара прибойного потока, путём бомбардировки и истирания горной породы обломочным материалом, который волна захватывает с собой со дна;

2. Химическая, то есть осуществляется под воздействием химических свойств морской воды, содержащей и растворы солей, и её растворяющей способности;

3. Термическая, разрушения пород происходит под воздействием температурной разницы воды и самой породы [11].

Так можно выразить основные факторы, определяющие динамику абразии:

1) гидрологические факторы, куда входят особенности волнового воздействия, энергия волн, направление течений, глубина водоема;

2) геологические особенности берега, которые определяют строение берегового массива, тип пород, условия их залегания, их размываемость, прочность структурных связей;

3) геоморфология берега, выражающая форму берегового уступа, геоморфологический тип берега, его высоту, крутизну откоса;

4) климатические факторы, характеризующие температурный режим водоема по сезонам года, наличие или отсутствие льда, количество выпадающих осадков;

5) Тектонические особенности региона и антропогенное влияние [14].

Для определения интенсивности процесса абразии С.А. Лукьянова и Г.Д.Соловьева [11] выделили 5 категорий опасности по скорости переработки берегов:

Начальная категория - практически безопасная - относится только к процессу абразии на низменных отмелых берегах, где волновое воздействие значительно ослаблено, но на которые значительно влияют такие гидрологические процессы как приливы и ветровые нагоны.

Вторая категория - незначительная опасность - объединяет берега, скорость волновой переработки которых составляет менее 1,2 м/год.

Третья категория абразионной опасности - умеренно опасная - характеризует скорость волновой переработки в пределах 1-5м/год.

Четвертая категория переработки берегов - опасная - отличается значительной скоростью разрушения берега (5-10 м/год).

Пятая категория - весьма опасная - подразумевает катастрофическое волновое разрушение берега со скоростью больше 10 м/год [11].

### 1.4 Разрушение береговой зоны Финского залива

Пораженность абразией материковых морских берегов можно наблюдать на многих территориях в России. Она распространена в таких морях как: Японское, Охотское, Берингово, Карское, Черное, Азовское и других, конечно же интенсивность поражения берегов различная. В большей степени в Балтийском море, да и вообще в России подвергается Калининградская область, т.е. Рижский залив. Там процесс абразии составляет примерно 100%, но лидирует (43%) все-таки незначительная категория опасности меньше 1,2 метра размытия в год. Но область, пролегающая ближе к Санкт-Петербургу, в значительно меньшей мере, но страдает от волнового размыва. В Финском заливе процесс оценивается на 35%, самая распространенная степень опасности – безопасная(65%), но также встречается незначительная(13%) и умеренная(22%), где размытее в год достигает 5 метров.

Развитие абразии в восточной части Финского залива неоднородно [15].



Рисунок 5 - Современное состояние береговой зоны Курортного района. Красный цвет – состояние берега аварийное; фиолетовый цвет – берег размывается, состояние берега опасное; зеленый цвет – берег стабилен.

 1 – размыв широких пляжей во время осенних штормов; 2 – прогрессирующий размыв авандюны; 3 – разрушение берегозащитных сооружений; 4 – размыв подводной террасы (http://www.evgengusev.narod.ru/laptev/spiri-9.jpg)

Так, на северном берегу (рисунок 5) в Курортном районе средние скорости отступания берега с 1990 по 2005 годы составило 50 см/год, повышающиеся местами до 2 м/год. Проблемными зонами также являются поселки Серово, Ушково, Комарово и Репино. В 80-ые годы около Комарово в качестве эксперимента была проведена отсыпка песка, что улучшило ситуацию с размывом, но на данный момент весь объем отсыпанного материала размыт. Отступание берега в пос. Лисий Нос и Ольгино доходит до 20-25 м [15,16]. На мелководье около пос. Солнечное развиты типичные аккумулятивные волновые образования, но поступающий сюда песчаный материал не расходуется на прирост пляжа. Сравнение состояния террасы и характера береговых процессов показало чем более размыта терраса, тем больший размыв испытывают берега [16].

На южной стороне залива процесс абразии не столь очевиден, но довольно-таки активно происходит. Дно мелководья залива обычно покрыто слоем песков мощностью от 20 см до 2 м и более, следовательно, отсутствует дефицит наносов, который является одним из основных факторов разрушений на противоположном берегу. Подводный береговой склон отмелый. При наличии сильных западных или юго-западных волн южный берег избегает прямого воздействия из-за особенностей расположения береговой линии на участках наибольших размывов. Подводная добыча песков на морском месторождении Лондонская отмель в 1990-е годы не проводилась. Хотя участок в Лужской губе до сих пор страдает после выемки песка, где в конце 1970-х годов площадь зоны аккумуляции составляла 2,24 км<sup>2</sup>, а к 2003 г. сократилась на 80% (до 0,5 км<sup>2</sup>)

Южный берег интенсивно разрушается, что, вероятно, связано с усилением штормовой активности в осеннее-зимний период в последние годы. Особенно страдает зона в районе пос. Бол. Ижора, где еще в древние времена сформировались сложные песчаные косы. Между ними расположены лагуны, которые обрастают растительностью и постепенно отдаляются от акватории. Здесь наблюдается чередование зон активного размыва, транзита и аккумуляции наносов (рис. 6), амплитуда изменений береговой линии достигает 5-7 м как в зонах абразии, так и на аккумулятивных участках. С 2004 по 2009 г. наблюдалась тенденция их перемещения в направлении потока наносов (на восток) со скоростью 13-15 м в год [15,17].

13



Рисунок 6 - Эволюция берега в районе песчаных кос пос. Бол. Ижора. (http://www.evgengusev.narod.ru/laptev/spiri-8.jpg)

Факторы, способствующие развитию абразию в это части залива:

- Устаревшие методы по защите берегов, провоцирующие перенос песка к западу и вынос к востоку;

- Несанкционированные способы берегозащиты местных владельцев;

-Разрушение береговой зоны из-за строительства, использования людьми не обустроенных для этого зон отдыха [18].

#### Глава 2 Материалы и методы исследования

#### 2.1. Данные об индикаторах ветрового волнения

Данные «индикаторов» были получены с сайта Copernicus Climate Change Service с 1979-2017 годы (https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-ocean-waveindicators?tab=overview). В наборе данных представлены индикаторы волнового климата, основанные на параметрах поверхностных волн океана, рассчитанных для общеевропейской области. Этот набор данных дает представление о европейском волновом климате под воздействием изменения климата.

Поле поверхностных волн океана рассчитывается с использованием модели волн ECMWF (Stand Alone WAM, SAW), вызываемой поверхностным ветром и учитывающей ледовый покров в полярных широтах. Волновой климат определяется с помощью параметров спектра волн, таких как значительная высота волны и пиковый период волны.

Значимая высота волны представляет собой среднюю высоту самой высокой трети поверхностных морских волн, создаваемых ветром и зыбью, между гребнем волны и впадиной волны. Этот параметр в четыре раза больше квадратного корня из интеграла по всем направлениям и всем частотам двумерного волнового спектра. При расчете учитывается разложения и на ветровые волны, и зыбь.

Период волны - это среднее время, за которое два последовательных гребня волны на поверхности моря проходят через фиксированную точку. Этот параметр рассчитывается как величина, обратная частоте, соответствующей наибольшему значению (пику) частотного спектра волны. Частотный спектр волны получается путем интегрирования двумерного спектра волны по всем направлениям.

В наборе данных в качестве индикаторов представлены параметры волнения с 90% и 99% обеспеченностью. Обеспеченностью называется вероятность в процентах факта, что высота волн окажется больше заданной величины. Соответственно, для 90% обеспеченности – это данные высот волн, которые выше 90% интегральной вероятности появления значений для всей выборки. Подобно - для 99% обеспеченности. Из этого следует, что выборка с обеспеченностью 90% -это диапазон наибольших значений волн по высоте, а другая выборка - это выдающиеся экстремумы, то есть максимальные значения высоты волн.

Чтобы оценить влияние изменения климата на поле поверхностных волн океана, набор данных представлен для двух периодов: данные с 1979 по 2005 годы - исторические данные - данные наблюдений, а также период с использованием реанализа воздействия ветра ERA5 для данных с 2001 по 2017 годы. Стоит учитывать, что данные рассматриваются только для изобаты 20 метров и то, что данные представлены как осредненное значение за весь выбранный промежуток времени в каждой пространственной точке попадающей в шаг по сетке 30 км.



Рисунок 7 - Область исследования "индикаторов". Тонкая линия показывает разделение на северное и южное побережье

Для выделенной области исследования с 59,4-60,5 с.ш. и 24-29,5 в.д. была построена карта распределения точек (Рисунок 7) и были рассчитаны первичные статистики, такие как: среднее арифметическое значение, стандартное отклонение, дисперсия, минимум, максимум, размах и коэффициент вариации.

Также были построены функции распределения значимой высоты волн обеспеченностью выше 90% и 99% за 2 климатических периода: 1979-2005 и 2001-2017 гг.

Помимо прочего, было проведено исследование различий высоты волн для южного и северного побережий. По какому принципу разделялась область на два берега можно увидеть на рисунке 8. Здесь были посчитаны те же первичные статистики, но для отдельных сторон. Для определения значимости различий выборок (с учетом разной обеспеченности) между северным и южным побережий, а так же для двух периодов проводилась проверка на равенство средних и дисперсий. Все это делалось с помощью критерия Стьюдента и Фишера. К дополнению к всему этому были построены функции распределения по двум временным отрезкам. Это было сделано для визуального наблюдения изменений диапазонов значимых волн по времени.

### 2.2 Данные о ветровом волнении

Данные были взяты с сайта Copernicus Marine Environment Monitoring Service(https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/ BALTICSEA\_REA-NALYSIS\_WAV\_003\_015) за трехлетние периоды с 1994 по 1996 годы и с 2019 годы. 2021 В качестве базы данных по использовалась модель BALTICSEA\_REANALYSIS\_WAV\_003 015. Она представляет собой ретроспективный анализ волновых условий в Балтийском море с 1 января 1993 года. Этот ретроспективный продукт состоит из набора данных с почасовыми данными о высоте, периоде и направлении волны как и для волнения в целом, так и по отдельности для ветрового волнения и зыби, а также дрейфа Стокса.

Продукт основан на волновой модели WAM 4.6.2 и на отдельных компонентах реанализа ERA5 ECMWF. Сетка продукта имеет горизонтальное разрешение в 1 морскую милю или примерно 1,85 км. Район охватывает Балтийское море, включая зону перехода к Северному морю (Датские проливы<del>,</del> Каттегат и Скагеррак).

Для данной работы использовались данные о наибольшей в спектре высоте волны для разных направлений волны для выбранной области исследования с 59,4-60,5 с.ш. и 29,0-30,2 в.д. (рисунок 8)



Рисунок 8 - Расположение выбранных точек в акватории Восточной части Финского залива

Для анализа использовались 7 точек с координатами (рисунок 9):

1. 60.158 с.ш. и 29.208 в.д.

- 2. 60.141 с.ш. и 29.458 в.д.
- 3. 60.141 с.ш. и 29.902 в.д.
- 4. 59.975 с.ш. и 29.541 в.д.
- 5. 59.908 с.ш. и 30.097 в.д.
- 6. 59.975 с.ш. и 29.541 в.д.
- 7. 59.991 с.ш. и 29.097 в.д.

Они были выбраны не случайным образом. В первую очередь отслеживались изменения между северным и южным берегами, поэтому точки с 1-4 относятся к северному берегу, а с 5-7 к южному. Во-вторых, с помощью 4 и 5 точки можно выявить изменения волнения из-за постройки Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений. Также в этом районе есть известные зоны активного разрушения пляжей такие как: пляж в районе пос. Солнечное (точка 3) и пляж в районе пос. Бол. Ижора (точка 6). Для удобства они были отмечены разными цветами.

В дальнейшем исходные данные подверглись обработке:

- волны в этих точках были отсортированы по 4 основным направлениям света: Север, Восток, Юг, Запад.

- были удалены значения, где по времени стоял лед. В дальнейшем такая сортировка помогла проследить изменения высоты волн в зависимости от направления.

- высота волн из ежечасной дискретности была усреднена до суточных значений.

- для сравнения различий в направлениях и их изменению по времени были построены розы волнения;

 для каждой точки по каждому направлению была построена временная изменчивость высоты волн для двух промежутков с 1994 по 1996 годы и с 2019-2021 годы.

- для временной изменчивости были оценены тренды. Для них была проведена проверка на значимость с помощью критерия Стьюдента.

- проверены гипотезы о равенстве средних и дисперсий для оценки различий между двумя временными промежутками.

19

#### 2.3 Статистические методы оценивания климатических изменений

Для проверки равенства выдвигается гипотеза о том, что средние значения или дисперсии двух рядов равны и противоположная ей, что значения не равны. Для средних значений проверка гипотезы проводилась с помощью tкритерия Стьюдента, а для дисперсии с помощью F-критерия Фишера. Рассчитывалось его эмпирическое значение по формуле:

$$t^* = \frac{\left|\bar{x}_1 - \bar{x}_2\right|}{\sqrt{N_1 D_1 + N_2 D_2}} \sqrt{\frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 - 2)}{N_1 + N_2}} \qquad \mathbf{F}^* = \frac{D_1}{D_2} \text{ или } \frac{D_2}{D_1} \quad (\mathbf{F}^* > 1),$$

Также определялось критическое значение критерия(tkp) по уровню значимости  $\alpha$ =0,05 и числу степеней свободы  $v = N_1 + N_2 - 2$ . А Fkp по тому же уровню значимости и числам степеней свободы  $v_1 = N_1 - 1$  и  $v_2 = N_2 - 1$ . Сравнивались эмпирические и критические значения критериев: если t\* и F\* больше чем tkp и Fkp, то гипотеза отвергается и различия в среднем или в дисперсии значимо, если нет – то гипотеза принимается и различия не значимы.

Оценка значимости тренда проводилась с помощью оценки значимости коэффициента корреляции (r) с рядом времени. Выдвигалась гипотеза о том, что r равен 0 и обратная ей - не равен. Проверка гипотезы проводилась с помощью критерия Стьюдента. Расчет эмпирического значения по формуле:

$$t^* = \frac{|r|}{\sigma_r}, \quad \sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{N-2}},$$

Определение критического значения критерия(tкp) происходило по уровню значимости  $\alpha$ =0,05 и числу степеней свободы равной **v** = **N**-2.

Если t\* больше tкр, то r значим, это означает, что тренд есть и вносит значимый вклад в дисперсию исходного ряда. Если нет, то r не значим - тренда нет.

## Глава 3 Сравнительный анализ высоты ветрового волнения за разные периоды времени по данным индикаторов

Рассматриваются значимые высоты волн за временные промежутки с 1979 по 2005 годы и с 2001 по 2017 годы при обеспеченности 90% и 99% (см. раздел 2.1). Стоит учитывать, что первый промежуток времени - данные исторические, т.е. данные непосредственных наблюдений, а второй промежуток времени – данные реанализа ERA5.

Ниже представлено графическое изображение полученных данных. (Рисунки 9-10).

Местоположение точек в пространстве не меняется ни со временем, ни с изменением обеспеченности.

На рисунке 9 представлено пространственное распределение точек с разбиением по диапазону высоты волн от 1,25 метров до высот выше 3,25 метров с интервалом деления 0,25 метра.

На рисунке 10 представлено то же самое пространственное распределение точек, но с обеспеченностью 99%. Здесь диапазон измерения высоты волн выше: от 1,5 метров до высот выше 4,5 метров с интервалом деления 0,5 метра.



Рисунок 9 - Значимая высота волн обеспеченностью 90% за 1979 по 2001(а) и 2001 по 2017 (б). Цветовая шкала отражает одинаковые интервалы высот волн



Рисунок 10 - Значимая высота волн обеспеченностью 99% за 1979 по 2007 (а) и 2001 по 2017 (б). Цветовая шкала отражает одинаковые интервалы высот волн

Общая картина распределения высот однотипная. Волнение приходит с открытой части Балтийского моря, волны наибольшей высоты заходят в Финский залив и по мере распространение вдоль этого узкого водного объекта становятся меньше, при подходе к берегу уменьшаются от 2,22 до 1,32 м в зависимости от периода времени и обеспеченности. В центральной части залива чаще можно увидеть довольно-таки высокие волны: для интегральной вероятности выше 90% - это волны высотой до 3,49 м для первого временного промежутка и до 2,58 м для второго; а для вероятности выше 99% - это значения достигают 4,90 м и 3,51 метра (Таблица 2). Наиболее крупные волны ударяют берега от Березовых островов до поселка Озерки. Наиболее низкие волны подходят: в Российской части залива - у восточных берегов Лужской и Копорской губ, а в зарубежной части - в районе городов Котка, Хельсинки и группы островов Пеллинге на территории Финляндии; к берегам поселка Азери и города Палдиски в Эстонии.

Изменчивость в пространстве всех рядов была однородна, коэффициент вариации у всех в пределах 12-14% (Таблица 2).

	90	)%	99%				
	1979-2005	2001-2017	1979-2005	2001-2017			
Среднее, м	2,79	2,02	3,83	2,77			
Стандартное откло-	0,34	0,28	0,51	0,38			
нение, м							
Дисперсия выбор-	0,12	0,08	0,26	0,15			
ки,м^2							
Минимум, м	1,78	1,32	2,22	1,75			
Максимум, м	3,49	2,58	4,90	3,51			
Размах вариации, м	1,71	1,26	2,69	1,76			
Коэффициент ва-	12,31	13,95	13,32	13,80			
риации, %							

Таблица 2 - Первичные статистики для индикаторов ветрового волнения за разные периоды времени

Если рассмотреть два разных периода, то можно заметить понижение высоты волны со временем не только по максимуму и минимуму, но и по средним значениям. Так же можно увидеть уменьшение в размахе вариаций и уменьшение дисперсии выборки.

Рассмотрим подробнее воздействия на побережья. А именно, разделим данные на северную и южную часть. Исследуем многолетние изменения высоты волн для двух побережий по отдельности (см. рисунок 7).

Таблица 3 - Первичные статистики для индикаторов ветрового волнения южного и северного

Побережье	жЮ	сное	Северное			
	1979-2005	2001-2017	1979-2005	2001-2017		
	90% o	беспеченность				
Среднее, м	2,75	1,93	2,82	2,10		
Дисперсия	0,10	0,07	0,14	0,08		
Минимум, м	2,03	1,32	1,78	1,36		
Максимум, м	3,47	2,51	3,49	2,58		
Размах вариации, м	1,44	1,19	1,71	1,22		
Коэффициент вариа-						
ции, %	11,32	13,41	13,02	13,33		
Стандартное отклоне-						
ние, м	0,31	0,26	0,37	0,28		
Длина ряда, шт	70	,00	8	31,00		
	99% o	беспеченность				
Среднее, м	3,82	2,75	3,83	2,78		
Дисперсия	0,20	0,11	0,31	0,17		
Минимум, м	2,76	1,87	2,22	1,75		
Максимум, м	4,90	3,46	4,80	3,51		
Размах вариации, м	2,15	1,58	2,59	1,76		
Коэффициент вариа-						
ции, %	11,72	12,30	14,63	14,99		
Стандартное отклоне-						
ние, м	0,45	0,34	0,56	0,42		
Длина ряда, шт	70	,00	81,00			

побережий Финского залива за разные периоды времени

По таблице 3 видно, что если при обеспеченности 90% за 1979 по 2005 годы на южном побережье среднее значение высоты волны 2,75 м, то за 2001-2017 годы уже 1,93м. Также раньше встречались волны высотой до 3,47 м, то в наше время это уже наибольшее - 2,51 метра.

Более сильные волны встречаются на северном берегу. Там средняя высота волн в 1979-2005 годы была 2,82, а с 2001 по 2017 уменьшилась и стала 2,10 метра. Это означает, что на это побережье волнение оказывает более сильное влияние, чем на южное. Дисперсия и стандартное отклонение были на северном побережье также выше, чем на южном.

Для проверки гипотез о равенстве средних значений и дисперсии для двух периодов времени у южного и северного побережья использовался критерий Стьюдента и критерий Фишера (таблица 4).

Таблица 4 - Оценка различий среднего и дисперсии индикаторов ветрового волнения на Северном и Южном побережьях Финского залива. tкp(0,05) = 1,97 .1,98 Fкp(0,05) =1,45 .1,49. Жирным шрифтом выделены значимые оценки.

	ť	*	F*								
Обеспеченность	90%	99%	90%	99%							
Различие Северного и Южного побережья											
1. 1979-2005 годы	1,26	0,13	1,39	1,57							
2. 2001-2017 годы	3,75	0,60	0,86	1,52							

Как видно из таблицы 4, значимые различия по среднему значению между северным и южным побережьями проявляются лишь за период с 2001-2017 годы при рассмотрении наибольших значений волн. Другие же не имеют таких различий средних, чтобы считать их значимыми. Следовательно, изменения высоких волн между двумя побережьями проявляли заметные отличия в 2001-2017 годы, то есть северном преобладало более сильное волнение, чем на южном. А при проверке равенства дисперсии значимыми оказались различия при обеспеченности 99%. Из этого можно сказать, что имеются явная разница в максимумах высот волн на разных берегах. Разброс высот волн на южной стороне был меньше, чем на северной.

Таблица 5 - Оценка различий среднего и дисперсии индикаторов ветрового волнения за два периода времени на разных побережьях Финского залива. Ткр(0,05) = 1,98. Fкр(0,05) =1,46. Жирным шрифтом выделены значимые оценки.

	t	*	F*									
Обеспеченность	90%	99%	90%	99%								
Различия периодов 1979-2005 и 2001-2017												
3.Северный берег	14.07	13.40	1.73	1.80								
	16.05	15,00	1,15	1,00								
4.Южныи оерег	10,85	15,90	1,45	1,75								

При сравнении различий между периодами 1979-2005 годы и 2001-2017 годы ситуация более показательна (Таблица 5). При проверке гипотезы о равенстве средних - все оценки оказались значимыми, то есть гипотеза отклонена, и различия между средними являются существенными, что физически показывает: значения волнения за 1979–2005 годы больше, чем в 2001-2017 годы. При рассмотрении же гипотезы о равенстве дисперсии только одна была принята (для дисперсий на южном берегу при обеспеченности 90%), все же остальные были отвергнуты и различия между дисперсиями оказалось значимыми. Это означает, что отклонение от среднего со временем уменьшилось, и на южной стороне высокие волны не очень сильно изменились, не так как в других случаях.

Если рассматривать функции распределения вероятности (Рисунки 11-14), то можно заметить количественные изменения высот волн не только по максимуму и среднему, но и по различным диапазонам.



Рисунок 11 - Функция распределения значимой высоты волн обеспеченностью 90% за 1979 по 2005 и за 2001 по 2017 для южного побережья



Рисунок 12 - Функция распределения значимой высоты волн обеспеченностью 90% за 1979 по 2005 и за 2001 по 2017 для северного побережья



Рисунок 13 - Функция распределения значимой высоты волн обеспеченностью 99% за 1979 по 2005 и за 2001 по 2017для южного побережья



Рисунок 14 - Функция распределения значимой высоты волн обеспеченностью 99% за 1979 по 2005 и за 2001 по 2017 для северного побережья

По рисунку 11, для южного побережья Финского залива, можно увидеть, что в период с 1979-2005 гг. основная высота волн (мода) была в промежутке с 2,75 метров по 3 метра, порядка 34% волнения сосредоточенно именно там. А с 2001 по 2017 года вся функция распределения переместилась в область более низких значений высоты волны, так что основная масса отразилась в промежутке с 2 до 2,25 м (34%). Уменьшение вероятности появления высоких волн (выше моды) с 17 до 7% скомпенсировалось повышением вероятности появления появления более низких волн (ниже моды) с 20 до 27%.

Для северного побережья (рисунок 12) мода функции распределения несколько размыта в пользу более высоких волн, что подтверждает предположение, что северный берег подвергается более серьезному динамическому воздействию. В остальном ситуация схожа с предыдущей: заметно, что в период с 1979-2005 год основная высота волн (мода) была в промежутке также с 2,75 метров по 3 метра (28%), но и выделяется участок с 3 метров по 3,25 метра (24%). А в период с 2001-2017 года вся функция сместилась в область более низких значений высоты волны, так что наибольшая частота волнения встречается в диапазоне с 2 метров по 2,25 метра (34%), и также выделяется участок с 2,25 метра по 2,5 метр(33%). Как видно, вероятность появления моды возросла с 28% до 34%.

Если сравнивать оба эти рисунка, можно сказать, что на северном побережье волнение с 1979-2005 годы по вероятности появления моды было меньше чем на южном берегу, но вероятность появления более высоких волн была выше. А с 2001-2017 годы как и вероятность моды стала преобладать, так и сохранился больший шанс на появление более высоких волн.

Если рассматривать только распределение экстремально высоких значений высоты волны (с обеспеченностью 99%), то эти значения со временем также понижаются. На южном побережье мода вероятностью 36% в диапазоне с 4,0-4,5 метров переходит в диапазон 2,0 - 2,5 метров, но её вероятность появления повышается до 49% (Рисунок 13). А для северного побережья в период с 1979-2005 гг. основная высота волн (мода) была в промежутке с 4,0 метров по 4,5 метра, порядка 33% волнения сосредоточенно именно там. Но так же выделяется участок с вероятностью около 31% в диапазоне волн высотой 3,5- 4,0 метра. А в период с 2001-2017 года мода переходит в диапазон 2,5 -3,0 метра и ее вероятность повышается до 39%. При этом сохранился выделяющийся участок, который тоже сместился в область более низких значений волн (3,0-3,5м) и вероятность появления увеличилась до 35% (Рисунок 14).

При этом стоит отметить, что в 2001-2017 годы диапазон волн высотой 3,0 -4,0 метра отмечается только у северного берега. Таким образом, экстремально высокие волны появляются все-таки чаще не на южном берегу, а на северном.

Подводя итоги, распределение характеристик высоты волны в пространстве закономерны, то есть в открытой части Финского залива встречаются наиболее высокие волны, при подходе к берегу - они уменьшаются, исключение составляют волны, которые сохраняют свою силу при прохождении всего залива и ударяют берега от Березовых островов до поселка Озерки.

Говоря о различиях между периодами 1979-2005 и 2001-2017 гг., то высота волны в Финском заливе со временем стала меньше по всем статистическим оценкам. Хотя в данном случае не стоит забывать, что значения в первом интервале - исторические, а во втором случае были получены с помощью реанализа, то соответственно можно предположить, что понижение высоты волны вовсе не связано с фактическим изменением, а с тем, что данные были скомпонованы разными способами, а еще больше - с недостатками модели, которая, как любая модель, «сглаживает» оценки: описывает меньшую, чем реальный процесс дисперсию, что приводит к занижению значений.

Однако, различие между северным и южным побережьем наглядно выявлено в оба периода времени и по полученным результатам можно предположить, что северный берег Финского залива больше страдает от волнения в связи с тем, что там преобладают волны более высокой величины. Данный вывод был сделан на основе не только средних и максимальных значениях, но и на основе функций распределения, где, несмотря на понижение высоты волны, вероятность появления более высоких волн возросла.

## Глава 4. Сравнительный статистический анализ характеристик волнения за разные периоды времени по данным реанализа

Рассматривается значимая высота волн (соответствующая максимуму спектра) по разным направлениям в 7 точках в восточной части Финского залива за временные промежутки с 1994 по 1996 годы и с 2019 по 2021 годы (см. раздел 2.2).

На рисунке 15-16 для каждой выбранной точки представлены розы волнения по 4 основным направлениям: Север, Восток, Юг, Запад. На каждой из них отображены розы для двух периодов: жирная линия - 1994-1996 годы; тонкая линия - 2019-2021.



Рисунок 15 - Расположение роз волнения по высоте волны в районе исследования

По рисунку 15, сразу же можно сказать, что высота волны со временем возросла. Не так сильно изменились параметры в точках 4 и 5, но это можно объяснить строительством Комплекса защитных сооружений, который препятствует прохождению высоких волн в Маркисову лужу. На выходе из района исследования (7 точка) волнение по двум периодам изначально выше, чем в других, так как находится ближе всего к более открытым районам Финского залива. Наиболее сильно увеличилась высота волны в точках 1 и 6. Так же можно сказать, что высота волн на северном побережье больше, чем на южном. Она на 16% выше для первого периода и на 23% для второго.

Рассматривая розы в каждой точке по отдельности (рисунок 16) можно сказать:

- В первой точке наиболее ярко выражено увеличение высоты волн западного направления с 0,24 м до 0,48 м и южного направления с 0,23 м до 0,51 м. Помимо этого увеличилась высота у волн восточного направления с 0,16 м до 0,25 м.

- Для второй точки характерно такое же изменение волны: западные - с 0,35 м до 0,54 м; южные- с 0,32 м до 0,45 м; восточные- 0,22 м до 0,30 м.

- В третьей и четвертой точках похожая картина только изменения уже не такие сильные и не происходит большого увеличения высоты восточного направления волн.

Таким образом, изменения на северном побережье сильнее происходит для волн западного и южного направления. А волны восточного направления становятся слабее по мере отдаления от зоны «открытого моря». А различия двух периодов в высоте волн северного направления не претерпевает изменений больше, чем 0,02 метра.

-В пятой точке происходит увеличение высоты волны северного направления с 0,11 до 0,21 м и западного направления с 0,16 м до 0,21 м.

-В шестой точке усиливается изменения и для волны северного направления ( с 0,12 м до 0,31 м), и волны западного направления ( с 0,14 м до 0,29 м).

- Для 7 точки волны: северного направления возрастают с 0,28 м до 0,34 м, а западного направления - с 0,46 м до 0,55 м.

Различия по южным точкам между двумя периодами в высоте волн восточного и южного направлениях не превышает 0,03 м. Получается, волнение

для южного побережья подвергается большим изменениям по волнам северного и западного направлениям.



Рисунок 16- Розы волнения по высоте волн, усредненной для периодов времени 1994-1996 и 2019-2021 гг. Номер на рисунке соответствует номеру точки.

Для того, чтобы получше исследовать показатели изменений в направления волнения были рассчитаны временные тренды и первичные статистики для каждого объекта исследования для волн северного направления - таблица 7, для волн восточного направления - таблица 8, для волн южного направления - таблица 9 и для волн западного направления - таблица 10). Кроме того, тренд для периода с 2019 по 2021 годы был проверен на значимость по критерию Стьюдента, а также были рассмотрены гипотезы о равенстве средних и дисперсии за периоды с 1994 по 1996 годы и с 2019 по 2021 годы для всех вышеуказанных показателей.

Расчеты первичных статистик показали, что происходит увеличение количества данных со временем во всех точках, кроме 1 (во всех случаях) и 2 (только при северном направлении волн). Объясняется это тем, что за 2019-2021 год начало ледообразования и таяние льда, то есть период стояния льда сократился. Лед стал позже появляться и раньше разрушаться, что привело к увеличению периодов формирования ветрового волнения и стало одним из факторов, приводящего к увеличению высоты волны. Исключения составляет 1 точка, так как в ней изначально лед не образовывался.

Помимо этого, произошло увеличение среднего значения высоты волны по всем объектам исследования, не считая среднее у волн северного и восточного направления для 3 точки. Это указывает на усиление волнения со временем. Также происходили изменения в дисперсии. СКО уменьшилось в точках 1-3 для северного направления волн и в точке 3 для восточного направления волн. В остальных же случаях происходило увеличение этой характеристики. Получается, разброс высот волн со временем в основном стал больше.

Из таблицы 7 выделяется первая и вторая точка, у которых не происходит больших изменений по характеристикам и различия для всех параметров не значимы (исключая значимый критерий Фишера у 1 точки). У всех остальных различия между средними сильнее и вносят больший вклад между двумя ряда-

35

ми. Величина у всех значимых трендов, кроме 3 точки (там идет понижение), повышается.

Если посмотреть приложение А, где представлено распределение среднесуточной высоты волны для двух периодов, то там ярко выражено увеличение высоты волн северного направления для «южных» точек (5-7) и почти не заметно их развитие у «северных» точек (1-4). Это связано с тем, что разгон волн еще не достаточный для точек 1-4, но, проходя через всю широту залива, увеличивается и ударяет южное побережье более сильными волнами. Наиболее сильно волнение развивается около берега у поселка Бол. Ижора (точка 6) – среднесуточные волны достигают высоты 1,8 метра, следующая по влиянию идет точка 7, находящаяся в более открытой части залива (волны до 1,5 м). Также заметно увеличивается частота случаев именно в точках 5-7.

По приложению Б видно, что волнение в восточном направление увеличивается везде, исключая объекты находящиеся около КЗС или за ним, особенно можно выделить местность у города Сестрорецка (зеленый, 3), где не происходит явного увеличения высоты волны. Волнение, идущее с востока, в данном случае начинается около Санкт-Петербурга и растет при продвижении на запад, к более открытым участкам моря. Поэтому точки 1, 2 и 7 находящиеся ближе к выходу из этого участка залива претерпевают наибольшие изменения в силе волнения, высота волны достигает 1,3 метра. Во всех точках наблюдаются значимые тренды (кроме точки 4) в течение трехлетнего периода с 2019 по 2021 годы. По всем объектам величина тренда увеличивается для высот волн в данном направлении. Кроме этого, отвергается гипотеза о равенстве средних и дисперсий, то есть существуют значительные расхождения между двумя периодами.

		1	4	2		3	4		5		6		7	
Годы	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-
	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021
Длина	250	100	133	130	143	171	204	257	291	487	272	438	230	318
ряда, шт														
Среднее,	0,12	0,13	0,16	0,17	0,10	0,08	0,11	0,13	0,11	0,21	0,12	0,31	0,28	0,34
М														
СКО, м	0,09	0,06	0,10	0,09	0,08	0,05	0,08	0,09	0,10	0,18	0,01	0,09	0,24	0,27
T1*	0	,83	0,	91	3,	82	2,11		8,68		9,43		2,58	
F*	2	,00	1,	11	3,	00	0,	88	3,	21	7,	45	1,	32
T2*		1,23		1,13		3,00		1,17		3,34		4,79		3,31
Примечан	ие: Т1*	относятс	я к прове	ерке на ра	авенство	средних з	значений	, где Т1кј	p(0,05) =	1,97, F* 1	к провер	ке на рав	енство д	испер-
сии с Гкр(	(0,05)=1	,34 для 1	и 2 точк	и; =1,30 д	для 3 точі	ки; = 1,24	для 4 то	чки; = 1,	19 для 5 и	и 6 точки	; = 1,22 д	ля 7 точн	ки. А T2'	* отно-
ситься к п	роверке	на значи	мость тре	енда, где	Т1кр(0,0	(5) = 1,98.	Все знач	имые зна	чения вы	делены ж	кирным і	прифтом	•	

Таблица 6 - Первичные статистики и проверка на значимость для северного направления волнения

Таблица 7 - Первичные статистики и проверка на значимость для восточного направления волнения

жирным шрифтом.

		1		2	3		4		5		6		7	
Годы	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-
	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021
Длина	406	337	241	362	152	224	223	306	262	461	231	326	254	348
ряда, шт														
Среднее,	0,16	0,25	0,22	0,30	0,11	0,08	0,14	0,16	0,13	0,16	0,14	0,17	0,29	0,29
М														
СКО, м	0,12	0,15	0,16	0,19	0,07	0,06	0,10	0,11	0,01	0,02	0,10	0,13	0,20	0,22
T1*	8,	,86	5,	62	3,	3,93		2,19		2,97		3,28		42
F*	1,	,65	1,	42	1,	52	1,	30	1,	49	1,78		1,	30
T2*		2,64		3,86		2,25		1,64		7,31		5,22		2,47
Примечани	ae: T1* c	относятся	к провер	оке на ра	венство с	редних з	начений,	где Т1кр	p(0,05) =	1,97, F* 1	к провер	ке на рав	енство Д	испер-
сии с Гкр(	0,05)=1,	27. A T2*	* относит	ъся к про	верке на	значимо	сть тренд	ца, где Т1	кр(0,05)	= 1,97. B	се значи	мые знач	ения вы,	делены

37

	_							_							
		1		2		3	4		5		6		7		
Годы	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	
	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021	
Длина	531	484	286	429	243	420	340	576	314	499	262	284	230	301	
ряда, шт															
Среднее,	0,23	0,51	0,32	0,45	0,21	0,28	0,20	0,26	0,13	0,14	0,14	0,15	0,29	0,30	
М															
СКО, м	0,18	0,41	0,26	0,34	0,17	0,22	0,15	0,17	0,01	0,01	0,10	0,10	0,19	0,21	
T1*	14	,77	5,	54	4,	4,58		5,78		1,40		0,37		0,82	
F*	5,	,23	1,	67	1,	61	1,	26	1,17		1,17		1,	20	
T2*		0,04		0,36		0,87		2,37		4,98		1,83		0,76	
Примечани	e: T1* o	тносятся	к провер	оке на ран	венство с	редних з	начений,	где Т1кр	(0,05) = 1	1,96, F* к	проверк	е на раве	енство д	испер-	
сии с Гкр(0	),05)= 1,	22. A T2 <sup>*</sup>	* относил	гься к пр	оверке на	а значимо	ость трен	да, где Т	1кр(0,05)	) = 1,97. I	Зсе значи	имые зна	чения в	ыделе-	
ны жирным	и шрифт	ом.													

Таблица 8 - Первичные статистики и проверка на значимость для южного направления волнения

Таблица 9 - Первичные статистики и проверка на значимость для западного направления волнения

жирным шрифтом.

	1		2		3		4		5		6		7	
Годы	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-	1994-	2019-
	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021	1996	2021
Длина ря-	724	660	484	655	518	679	474	629	415	620	456	662	559	747
да, шт														
Среднее,	0,24	0,48	0,35	0,54	0,27	0,38	0,21	0,28	0,16	0,21	0,14	0,29	0,46	0,55
М														
СКО, м	0,18	0,41	0,26	0,43	0,20	0,31	0,03	0,04	0,11	0,16	0,11	0,20	0,33	0,41
T1*	14,	55	8,	90	6,92		5,71		5,75		14,01		4,53	
F*	5,	12	2,	90	2,	37	1,	73	1,	93	3,40		1,	58
T2*		1,92		2,32		1,83		0,19		3,34		5,03		2,20
Примечани	е: Т1* от	носятся	к провер	ке на рав	венство ср	редних зн	начений,	где Т1кр	(0,05) = 1	,96, F* к	проверке	е на раве	нство ді	испер-
сии с Fкp(0,	,05)=1,1	6. A T2*	относит	ъся к про	верке на	значимо	сть тренд	а, где Т1	кр(0,05) =	= 1,97. Bc	е значим	ые значе	ния вы)	целены

38

Для волнения южного направления, ситуация развития волнения противоположна северному. Наибольший разгон волн (приложение В) приходится на точки 1-4 (на севере). Он увеличивается по мере удаления от Невской губы, так как залив расширяется в эту сторону и появляется больше места для развития волн. Максимальная среднесуточная высота достигает 2.5 метров около поселка Пески (точка 1). По таблице 9, по значимости трендов за последний трехлетний период выделяются точки, находящиеся в Маркисовой луже, хотя величина тренда там при сравнении с 1994-96 года почти не изменяется , а значимые различия в средних и дисперсиях наблюдаются в точках на севере.

В волнении западного направления появляются наиболее значительные высоты волн. Различия между 1994-1996 годами и 2019-2021 годами между средними и дисперсиями значительные в каждом случае. Значимые тренды за трехлетний отрезок времени наблюдаются у точек 5, 6, 7 за второй период у 2 точки за первый. Величина тренда увеличивается. Если посмотреть в приложение Г, можно подметить, что наибольшая высота волн проявляется в более открытых исследуемых участках. Так получается, вследствие того что разгон волны начинает происходить в Балтийском море и двигаясь на восток, нагоняются крупные волны в Финский залив. Преградой ему служит берега и КЗС, защищающий Санкт-Петербург от наводнений. Поэтому в точках 4 и 5 волнение не такое сильное, как могло быть. Так же в точке 6 около Бол. Ижоры не наблюдается высоких волн, так как преградой волнам служит природный береговой выступ, где находится мыс Серая Лошадь. В целом наибольшие значения в волнении проявляются около точки 6, там высота достигает 3 метров.

Во всех рассмотренных случаях, величина тренда не превышала 0,001 метра в год.

Исходя из вышеизложенного, можно говорить о том, что высота волны зависит от направления волнения. Наибольшее влияние оказывает на каждую исследуемую точку западное направление, где наблюдаются самые высокие волны. Для северного побережья оказывает максимальное влияние южное направление, а для южного побережья - северное. А наиболее протяженный путь проходят волны, идущие от запада до востока, вдоль которого растянут Финский залив. А восточное направление не выделяется сильно из-за КЗС.

Стоит заметить, что высота волны увеличивается во времени и в частоте случаев повторений – это связано с климатическими изменениями, в частности: с изменением времени появления и продолжительности стояния льда.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были изучены физико-географические особенности восточной части Финского залива для лучшего понимания объекта исследования. Так же раскрыта проблема разрушения берегов, как одного из факторов, почему необходимо исследовать изменения характеристик волнения в данной акватории.

Были сделаны следующие выводы:

1. При анализе индикаторов ветрового волнения выявлено сильное понижение высоты волны со временем, которое, скорее всего, не отражает фактического изменения данных характеристик, а связано с использованием вместо наблюдений, как в данных о 1979-2005 годах, модели реанализа, которая «сглаживает» оценки: описывает меньшую, чем реальный процесс дисперсию, что приводит к занижению значений. Поэтому сравнения между периодами в этом случае неадекватны.

2. По данным индикаторов ветрового волнения было определено, что распределение характеристик высоты волны в пространстве закономерны, то есть в открытой части Финского залива встречаются наиболее высокие волны: для обеспеченности 90% - высотой до 3,49 м для 1979-2005 гг. и до 2,58 м для 2001-2017 гг. ; а для экстремумов значения достигают 4,90 м и 3,51 метра соответственно. При подходе к берегу волны уменьшаются до 1,32 м в зависимости от периода времени и обеспеченности, исключение составляют волны, которые сохраняют свою силу при прохождении всего залива и ударяют берега от Березовых островов до поселка Озерки. Также было выявлено, что северный берег испытывает на себе более сильное воздействие волнения за счет больших высот волн, чем южный берег.

3. Исследование по суточным данным о высоте ветрового волнения выявило, что высота волны зависит от направления: наибольшие волны выявляются при их западном направлении во всех точках. На южном побережье наи-

41

большие волны отмечаются при северном направлении, а на северном побережье - при южном направлении.

4. В период 2019-2021 гг по сравнению с 1994-1996 гг. высота волн в восточной части Финского залива статистически значимо увеличилась по средней величине в 1.5-2 раза, а также по дисперсии. Это может быть связано с уменьшением количества дней ледостава из-за потепления.

#### Список использованных источников

1. Финский залив Балтийского моря/ ФАВР Невско-Ладожское бассейновое водное управление. URL: http://www.nord-west-water.ru (дата обращения: 28.04.2022).

2. Гогоберидзе Г.Г., Рябчук Д.В. Научное обеспечение сбалансированного планирования хозяйственной деятельности на уникальных морских береговых ландшафтах и предложение по его использованию на примере Азово-Черноморского побережья: отчет по НИР, выполненной по заказу Министерства экономического развития Российской Федерации (Государственный контракт №1906-17-12), том 2 / Учреждение Российской академии наук Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. - 2013.- С.240-245

**3.** Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря / Гл.ред. О.В. Петров. - СПб, ВСЕГЕИ, 2010. - 78 с.

4. Амантов А.В., Жамойда В.А., Рябчук Д.В., Спиридонов М.А., Сапелко Т.В. Геологическое строение подводных террас восточной части Финского залива и моделирование условий их формирования на послеледниковом этапе развития региона // Региональная геология и металлогения. 2012. №50. С. 15-27.

5. Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Спиридонов М.А., Куренной Д.Н. Береговой профиль восточной части Финского залива: результаты наблюдений и реконструкция развития в позднем голоцене // Океанология. 2010. Т 50. № 6. С. 1034–1044

6. Некрасов А.В., Еремина Т.Р., Провоторов П.П. Гидрофизические процессы // Финский залив в условиях антропогенного воздействия. – СПб.: изд-во АН РФ, 1999. С.5-47

7. Леонтьев И.О. Бюджет наносов и прогноз развития берега // Океанология. 2008. Т.48, № 3. С. 467-476

 Лоция Балтийского моря. Часть 1. Восточная часть моря с Финским и Рижским заливами. – Издание ГУНиО, 1989

43

**9.** Лопатухин Л.И. Ветровое волнение. - СПб: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2012.

**10.** Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях /под ред. Е.С.Нестерова.- М., Росгидромет, 2013.- С.295

11. Лукьянова С. А., Соловьева Г. Д. Абразия морских берегов России // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2009. №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/abraziya-morskih-beregov-rossii (дата обращения: 28.04.2022).

**12.** "Морской энциклопедический словарь " в двух томах, том 1. Под редакцией академика Н.Н.Исанина

13. Сафьянов Г.А. Геоморфология морских берегов.- Москва, 1996.

14. Береговые процессы: мониторинг и инновационные комплексные исследования: Учебное пособие / В.С. Исаев, А.В. Кошурников, Е.И. Игнатов, Е.С. Каширина, А.А.Новиков, А.И. Гущин, О.И.Комаров, П.Ю. Пушкарев, М.Л. Владов, П.И. Котов, В.В. Вербовский, Р.М. Аманжуров, Е.И. Горшков; Под редакцией профессора Е.И. Игнатова, доцента В.С. Исаева. - Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2018 – С.246

15. Спиридонов М.А., Рябчук Д.В., Орвику К.К. и др. Изменение береговой зоны восточной части Финского залива под воздействием природных и антропогенных факторов // Региональная геология и металлогения. 2010. № 41. С. 107-118

16. Рябчук Д.В., Спиридонов М. А., Сухачева Л. Л и др. Рельеф, геологическое строение и экзогенные геологические процессы береговой зоны Курортного района Санкт-Петербурга // Регион. геология и металлогения. 2008. № 36. – С. 109–120

17. Сухачева Л. Л., Кильдюшевский Е. И. Исследование изменчивости берегов восточной части Финского залива на основе ретроспективного анализа данных аэро и космических съемок // Сб. тезисов VII Международного форума «День Балтийского моря». 21–23 марта 2006. – СПб., 2006. – С. 254–255.

18.Sergeev A., Ryabchuk D., Zhamoida V., Nesterova E. The impact of two newly built port terminals in the Eastern Gulf of Finland on sedimentation processes and coastal zone dynamics // Estonian J. of Engin. 2009. Vol. 15.  $N_{2}$  3. – P. 212–226.

# Приложение А

# Приложение Б

# Приложение В

Приложение Г